

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2024.03.020

引文格式:

熊露, 郁永彬, 李锦伟, 等. 元青花钴料微区化学组成差异性特征研究[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(3): 601–607.

XIONG Lu, YU Yongbin, LI Jinwei, et al. Chemical compositions of Co-based materials in Yuan Dynasty blue-and-white porcelains [J]. Journal of Ceramics, 2024, 45(3): 601–607.

元青花钴料微区化学组成差异性特征研究

熊露¹, 郁永彬^{1,2}, 李锦伟¹, 吴强¹, 吴琳¹, 李其江¹

(1. 景德镇陶瓷大学 古陶瓷研究中心, 江西 景德镇 333001; 2. 国家文物局 考古研究中心, 北京 100013)

摘要: 同一元青花瓷器母线旋纹与主题纹蓝彩色泽等装饰效果存异, 本研究为探索其微区化学组成特征差异, 采用能谱仪(EDXRF)对景德镇陶瓷大学博物馆馆藏元青花绘饰内容进行无损分析并进行实验模拟, 取得以下成果: (1) 探明了这批标本所用钴料组成特征以及其类别归属; (2) 揭示了母线旋纹与主题纹饰化学组成差异以及其特征; (3) 厘清了钴料工艺提纯对形成特征差异之间的关系; (4) 佐证了元青花瓷已开始出现不同的绘饰用料, 继而影响明清时期青花瓷绘饰体系。该研究不仅为元青花瓷科技研究提供新的角度, 同时为进一步探索中国青花瓷绘饰体系提供参考。

关键词: 元青花; 微区差异; 实验模拟; 提纯工艺

中图分类号: TQ174.4⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2024)03-0601-07

Chemical Compositions of Co-Based Materials in Yuan Dynasty Blue-and-White Porcelains

XIONG Lu¹, YU Yongbin^{1,2}, LI Jinwei¹, WU Qiang¹, WU Lin¹, LI Qijiang¹

(1. Research Centre of Ancient Ceramics, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen, 333001, Jiangxi, China;

2. National Centre for Archaeology, National Cultural Heritage Administration, Beijing, 100013, China)

Abstract: The Chinese Yuan Dynasty blue-and-white porcelains exhibit different ornamentation effects, such as bow string and main patterns. In this study, ten pieces of blue-and-white porcelains in the Jingdezhen Ceramic University Museum were examined using energy-dispersive X-ray fluorescence to reveal the chemical compositions in their microzones. Four key findings were obtained. Firstly, the Co-based material used in the specimens was imported ore with high Fe and low Mn contents, with certain quantity of Ni and As. Secondly, the bow-string and main patterns had different (Fe+Mn)/Co ratios, with the main patterns having lower ratios, suggesting purer Co characteristics. Thirdly, the differences in the elemental ratios were verified using a historical purification process, whereby the main pattern was speculated to be painted with purified Co-based materials. Finally, the material differences that began to appear during the Yuan Dynasty, which influenced the painting of blue-and-white porcelains in the Ming and Qing dynasties, were investigated. This study provided with a new perspective on the Yuan Dynasty blue-and-white porcelains and the development of decoration systems for Chinese blue-and-white porcelain paintings.

Key words: blue-and-white porcelain in Yuan Dynasty; microregional difference; experimental simulation; purification technology

收稿日期: 2023–12–28。

修订日期: 2024–03–12。

基金项目: 江西陶瓷文物遗存保护暨御窑研究协同创新中心项目(JXYY2105); 江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD20081); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ211326); 江西省教育厅科技项目(GJJ160878); 2023 年景德镇市科技局科技计划项目(20234SF001); 2023 年江西陶瓷文物遗存保护暨御窑研究协同创新中心项目(JXYY2012)。

通信联系人: 郁永彬(1987–), 男, 博士, 副研究员。

Received date: 2023–12–28.

Revised date: 2024–03–12.

Correspondent author: YU Yongbin (1987–), Male, Ph.D., Associate researcher.

E-mail: yu_yb1987@163.com

0 引言

我国青花瓷的起源最早可追溯到唐代,至元代开始兴盛,明清时期瓷绘技艺已基本形成特有的体系,可以说青花瓷是中国陶瓷发展史上影响最大、成就最高的陶瓷品种之一^[1]。中国传统青花瓷均以氧化钴为主要着色剂,在坯体上或釉料上绘饰纹样后入窑高温还原烧制,俱变青翠,其作品绘饰语言与表现形式展现的独特魅力为世人所喜爱。由于青花绘饰所用钴料属一种原生矿物,不同地区原料成分中氧化铁、氧化钴、氧化锰等着色元素有一定的差异性,致使青花瓷作品纹饰呈现出不同的蓝彩色泽。

长期以来,研究人员大多从烧成制度、釉料配方、青花笔法等角度来解释青花瓷蓝彩色泽的差异^[2-4],而钴料的化学组成差异性特征也是重要的影响因素之一。迄今为止,尚无研究者从化学组成差异的角度对元青花各纹饰区域特征进行系统性研究,这些绘饰内容所用钴料化学组成特征如何?同一青花器物不同纹饰内容所用钴料化学组成是否有差异?明清时期青花绘饰体系的形成与元代绘饰用料差异是否有影响关系等,诸如此类学术问题尚需进一步深入探讨。

鉴于元代青花瓷钴料研究的重要性,科学探讨元青花瓷钴料化学组成特征和子母线旋纹、主题纹饰等微区差异性以及青花瓷绘饰体系传承关系等问题有待进一步探讨。本文在前人研究的基础上,以景德镇陶瓷大学博物馆馆藏元青花标本为研究对象,采用能量色散 X 射线荧光光谱仪(EDXRF)对其子母线旋纹、主题纹饰等绘饰部分进行无损测试分析,同时研究了 9 种钴料的提纯工艺,以还原元青花绘饰工艺的真实面貌,并揭示同一器物青花纹饰色泽浓淡差异产生的原因,该研究结果可为我国元代青花瓷的科技研究提供科学数据,丰富对元青花瓷绘饰技艺的认识,同时为后续研究提供一定的理论支撑。

1 实验样品和测试仪器

1.1 样品来源

以景德镇陶瓷大学博物馆馆藏元青花标本作为研究对象,随机选取不同类型的 10 件青花瓷样品对其子母线旋纹、主题纹饰等绘饰内容进行微区化学组成测定。图 1 为测试分析定位点示意图。



图 1 编号 534 样品测试定位点
Fig. 1 Location points for the test of Sample 534[#]

1.2 实验仪器与相关参数

采用美国 EDAX 公司生产的 Eagle-III 型能量色散 X 射线荧光光谱仪进行半定量分析。主、次量元素组成的测试条件: X 光管电压为 50 kV,管电流为 200 μ A,经毛细管光学系统聚焦后的束斑直径为 40 μ m,测试时间 400 s,掠射角和出射角分别为 65°和 60°。同时,使用了日本基恩士 VHX-6000 超景深三维显微系统环形光源、250 倍镜进行样品显微结构观察。表 1 分别列出了样品各纹饰部位及釉的化学组成数据。

2 结果与分析

2.1 钴料类型归属

不同类型钴料的最大区别在于着色元素铁钴锰以及其痕量元素含量,其中,着色元素的比例浓度是影响青花发色的重要因素之一。前人认为进口青料和国产青料的 m_{Fe}/m_{Co} 比和 m_{Mn}/m_{Co} 比相差较大,进口青料中的 m_{Fe}/m_{Co} 较国产高,而 m_{Mn}/m_{Co} 比则相对较低^[5]。为初步判别此批青花所用钴料类型,收集同时期云南国产元青花、景德镇官窑元青花^[6]以及国产钴土矿色料^[7]化学组成数据作对比分析,图 2 画出了 m_{Fe}/m_{Co} 、 m_{Mn}/m_{Co} 质量比散点。以察样品青花钴料中着色元素 Fe、Mn、Co 的组成差异特征。由图 2 可见,五类样品大致分布在三个区域,其中,云南元青花样品与国产钴土矿样品较集中在同一个区域,而所测样品主题纹饰与景德镇官窑元青花化学组成数据分布范围较为相似,但馆藏样品的离散程度较官窑样品更大,子母线旋纹含铁量较高。结合进口料与铁矿伴生,和国产料与锰矿伴生的特征,此批样品绘饰所用青花应属一类“高铁低锰”型矿料特征。

表 1 样品微区的主要化学组成含量(wt.%)
Tab. 1 Chemical composition (wt.%) of decoration components and glazes of the tested samples

Sample	Component	wt.%										$\mu\text{g/g}$	
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	CoO	Fe ₂ O ₃	MnO	As ₂ O ₃	Ni ₂ O ₃
163	Bow-string pattern	3.54	0.35	15.23	70.10	3.28	5.61	0.10	0.09	0.80	620	76	47
	Theme decoration	1.75	0.45	12.95	66.80	2.42	10.12	0.05	1.66	4.44	950	71	512
	Glaze	3.90	0.22	14.14	71.59	3.17	5.27	0.09	—	0.62	530	—	—
165	Bow-string pattern	3.72	0.45	13.38	70.87	3.45	6.39	0.03	0.05	0.71	810	73	48
	Theme decoration	2.59	0.27	12.51	72.67	3.17	6.29	0.03	1.06	1.47	600	66	240
	Glaze	3.21	0.41	13.26	72.34	3.28	5.80	0.03	—	0.66	560	—	—
167	Bow-string pattern	1.38	0.29	15.05	70.90	4.44	5.87	0.06	0.07	1.01	630	71	44
	Theme decoration	2.68	0.35	12.28	64.82	3.81	7.60	0.04	1.12	7.42	970	156	163
	Glaze	1.88	0.41	14.99	70.59	4.39	5.80	0.03	—	0.92	580	—	—
176	Bow-string pattern	3.00	0.32	14.23	70.33	4.18	5.85	0.06	0.08	1.03	930	69	122
	Theme decoration	1.00	0.13	12.35	72.33	4.06	6.50	0.05	0.63	2.59	770	87	206
	Glaze	3.40	0.86	13.39	69.77	4.31	6.17	0.05	—	1.04	980	—	—
181	Bow-string pattern	3.51	0.56	12.15	71.23	3.68	7.02	0.04	0.04	0.82	530	66	16
	Theme decoration	2.84	0.63	12.25	66.35	3.85	7.41	0.10	1.49	5.57	800	74	423
	Glaze	3.30	0.19	12.89	70.65	3.77	7.30	0.03	—	0.88	610	—	—
190	Bow-string pattern	3.91	0.53	12.93	70.62	2.69	7.10	0.05	1.17	0.12	910	66	154
	Theme decoration	3.43	0.07	12.99	70.32	2.84	6.60	0.02	2.73	0.54	850	66	261
	Glaze	3.38	0.16	13.44	71.31	2.72	7.25	0.02	—	1.04	930	—	—
204	Bow-string pattern	2.08	0.37	12.11	74.18	4.42	4.85	0.04	0.08	0.94	690	66	177
	Theme decoration	2.10	0.29	12.24	71.13	5.42	4.86	0.04	1.13	2.92	780	82	541
	Glaze	0.69	0.10	12.82	73.49	5.02	6.07	0.05	—	0.76	750	—	—
214	Bow-string pattern	3.08	0.10	12.46	73.82	3.52	4.99	0.04	0.10	1.00	710	66	78
	Theme decoration	2.74	0.00	13.14	68.89	3.31	7.38	0.05	0.54	3.54	780	70	177
	Glaze	3.61	0.31	11.93	74.12	3.28	4.98	0.03	—	0.74	600	—	—
534	Bow-string pattern	2.75	0.09	13.57	71.91	2.73	7.11	0.03	0.05	0.79	750	71	153
	Theme decoration	2.79	0.20	12.45	70.29	2.66	7.14	0.02	0.96	3.44	660	89	322
	Glaze	3.05	0.30	13.14	72.16	2.97	6.57	0.05	—	0.75	730	—	—
535	Bow-string pattern	4.09	0.23	13.08	71.58	3.49	5.54	0.03	0.06	0.98	790	69	134
	Theme decoration	3.36	0.87	13.03	66.15	3.43	6.46	0.05	1.30	5.65	740	92	294
	Glaze	3.11	0.24	13.79	71.13	3.37	6.34	0.06	—	0.96	860	—	—

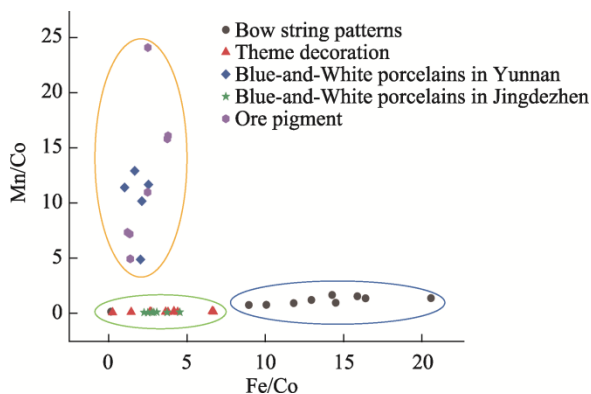


图2 不同样品化学组成比例含量散点图

Fig. 2 Scatter plot of chemical compositions of the samples

除用 Fe、Mn、Co 着色元素含量判断青花钴土矿类型外,前人也常用矿料中是否含有 Ni 和 As 判断其类型归属^[8]。从图 3 可知,所测样品中青花纹饰部位含有一定比例的氧化镍和氧化砷,与已知国产钴料的化学组成特征不符^[9]。这进一步佐证了此批青花瓷绘饰所用钴料可能来自同一类进口矿料。

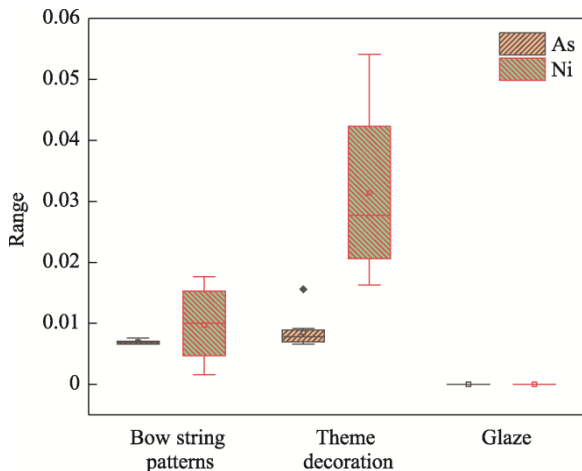


图3 样品青花及釉镍砷含量对比

Fig. 3 Ni and As contents in the blue-and-white porcelain samples

2.2 青花钴料微区差异分析

细微观察元青花瓷标本留下的工艺痕迹,同一片青花瓷标本上不同纹饰区域均呈现深浅不一的色调。陈殿^[10]指出,随着绘饰技艺的发展演变,元青花绘饰除了用线条表现外,还增加了在线条内外的轮廓内填色技法,总结出元青花绘饰表现的差异与青花笔法息息相关^[11-12]。而不局限于青花绘饰笔法对青花呈色产生的影响,本文对比分析主题纹饰及子母线旋纹的化学组成数据,从表 1 可知,样品青花纹饰中子母线旋纹及主题纹饰 m_{Si}/m_{Al} 比均值在 5.36~5.47 之间,而 Al_2O_3 在蓝彩中不但能调整其熟成温度,还能减少蓝彩的流

动和笔路不清的弊端^[13],单独考察 Al_2O_3 的含量的影响,子母线旋纹中 Al_2O_3 的含量约波动于 12%~15%之间,均值为 13.419%,主题纹饰含量约波动于 12%~13%之间,均值为 12.619%,两者差别不大。从图 4 可见,子母线旋纹与主题纹饰区域气泡差异性不大,呈现效果较为相似。

从图 5 可知,样品子母线旋纹 m_{Fe}/m_{Co} 、 m_{Mn}/m_{Co} 以及 $m_{(Fe+Mn)}/m_{Co}$ 比值较大且离散,而主题纹饰则相对集中,呈现这种特征性组成差异的原因可能在于子母线旋纹选用了 $m_{(Fe+Mn)}/m_{Co}$ 含量相对较高的矿料,应属未提纯的伴铁原生钴矿。主题纹饰则应是使用了除铁、锰后品质较好的钴料进行绘饰所致。

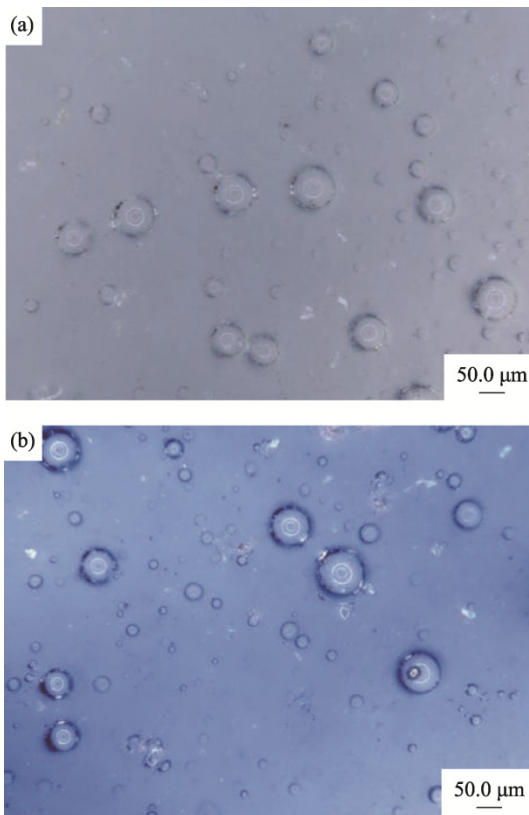


图4 超景深显微镜观察微区纹饰气泡:

(a) 子母线旋纹; (b) 主题纹饰

Fig. 4 Microzone decorative bubbles observed using an ultra-depth field microscope in the bow-string patterns (a) and theme decoration (b)

2.3 实验模拟

根据明《江西省大志·陶书》记载:“敲青后取其奇零琐碎碾碎,入注水中,用磁石引杂石,真青沉淀……”^[14]由于钴料采用了一系列的精选提纯工艺,一般能使钴土矿中的 m_{Mn}/m_{Co} 下降 40%~50%、 m_{Fe}/m_{Co} 下降 60%~90%,相对提高了氧化钴的含量,这样使青花发色更为纯蓝^[15]。为验证元青花绘饰内容着色元素比例变化以及不

同绘饰区域蓝彩色调变化的原因,实验选取 9 种国内外青花钴料进行提纯处理,绘饰并烧制出青花瓷试样进行化学组成测定。图 6 中编号 GT-1 ~ GT-9 分别为浙江金华、浙江江山、浙江丽水、浙江东阳、湖南衡阳、江西上高、四川甘孜、云南宣威、土耳其的钴土原矿,编号 GTT-1 ~ GTT-9 分别对应为提纯工艺处理后的钴矿。将上述 9 种钴土原矿置于玛瑙碾钵中用湿法磨至 250 目筛进行精选,筛选后原料经过 12000GS 强磁器除杂 5 min 用于绘饰纹样。图 7 为实验模拟烧制的青花瓷样品,其中,“双圈子母纹”为钴土原矿绘饰,“数字纹”为工艺提纯后钴土矿绘饰。

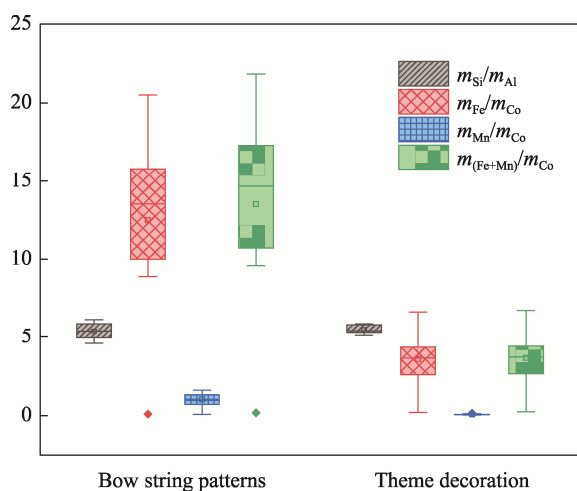


图 5 元素含量比例差异

Fig. 5 Comparison of the elemental content ratios

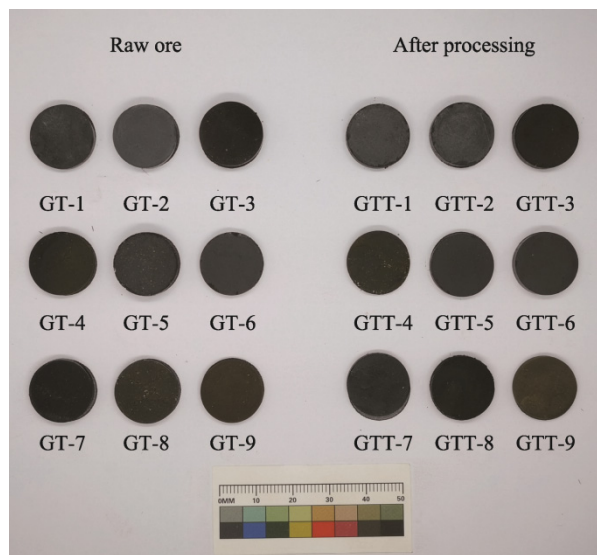


图 6 钴土矿试样

Fig. 6 Raw Co ores (GT-1 to GT-9)

结合化学组成测定并对其数据进行分析,如表 2。结果表明,钴土矿的提纯工艺处理使得 $m_{(Fe+Mn)}/m_{Co}$ 比下降约 21% ~ 60%,均值下降 37%。

从图 8 不同绘饰内容化学组成差异聚类条形图可见, $m_{(Fe+Mn)}/m_{Co}$ 比均呈现下降的趋势,验证了导致绘饰内容化学组成产生差异的原因是由于钴土矿工艺提纯的结果,进而使得子母线旋纹与数字纹饰浓淡色泽产生差异。



图 7 青花瓷模拟样品

Fig. 7 Simulated samples of blue-and-white porcelain

2.4 选料传承

据明万历《江西省大志》载:“至若写字打箍,费青尤甚。”^[16]说明箍线所使用的青花料较多,理应使用价廉物美的矿料进行使用。而明《天工开物》:“就车上旋转打圈。圈后或画或书字……”^[17]明《陶冶图说》:“画者、染者各分类聚处一室……”^[18]等表明,最迟在明万历时期,青花瓷绘饰内容就由不同匠工完成并有比较严格的绘饰体系,且首尾相连的环形子母线旋纹应在利坯后首先绘饰于坯体而后再进行主题纹饰绘饰,且旋纹出自旋坯工之手。然而由于历史久远,目前尚未发现有关元代青花绘饰钴料选择方法、用料差异等相关问题的详细记载,但最早有关设色矿料选用确有元《南村辍耕录》“凡合用颜色细色:头青、二青、三青……”^[19]元《竹谱》:“入清胶水研陶,分作五等……”^[20]等等记载,钴土矿按理也属国画矿物一类,理应在元代时期按类似方法加以分选使用。同时,结合上述绘饰内容 $m_{(Fe+Mn)}/m_{Co}$ 的比例变化以及景德镇市落马桥元代遗址出土“头青”火照^[21](见图 9),有理由相信元代青花瓷匠为凸显主题纹饰,应已开始有意识地对钴矿进行提纯并加以绘饰,并逐渐影响明清时期青花绘饰体系,产生系统的用料选择及分工体系。

表 2 青花模拟实验化学组成含量(wt.%)

Tab. 2 Chemical compositions (wt.%) of the blue-and-white ornaments painted on the simulated samples

Specimen number	Component	wt.%									
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	CoO	Fe ₂ O ₃	MnO
1#	Bow-string patterns	1.73	1.57	14.82	71.28	4.00	5.15	0.04	0.04	0.41	0.00125
	Digital ornament	1.53	1.45	14.26	71.74	4.26	5.30	0.06	0.05	0.40	0.00381
2#	Bow-string patterns	3.04	1.31	13.83	71.52	4.17	4.60	0.05	0.12	0.48	0.00819
	Digital ornament	1.26	1.18	14.95	71.84	4.43	4.78	0.06	0.17	0.50	0.01118
3#	Bow-string patterns	1.10	1.28	13.72	73.06	4.38	4.86	0.06	0.06	0.54	0.00343
	Digital ornament	0.92	1.39	14.56	72.11	4.32	4.89	0.07	0.22	0.73	0.01238
4#	Bow-string patterns	1.07	1.49	14.66	72.00	4.25	5.04	0.04	0.09	0.45	0.00624
	Digital ornament	1.13	1.27	14.49	72.84	4.25	4.45	0.06	0.14	0.52	0.01226
5#	Bow-string patterns	1.03	1.21	14.38	72.55	4.27	5.02	0.05	0.06	0.49	0.00287
	Digital ornament	1.13	1.19	14.77	71.69	4.47	5.00	0.07	0.15	0.68	0.01015
6#	Bow-string patterns	1.64	1.44	14.14	71.66	4.36	5.31	0.05	0.03	0.40	0.00163
	Digital ornament	1.89	1.51	14.05	71.74	4.30	4.93	0.07	0.05	0.51	0.00302
7#	Bow-string patterns	1.85	0.89	14.25	72.12	4.33	5.20	0.05	0.10	0.30	0.00056
	Digital ornament	0.55	1.15	14.01	73.51	4.52	4.89	0.06	0.20	0.31	0.00133
8#	Bow-string patterns	0.03	0.00	14.80	74.85	3.98	5.17	0.01	0.07	0.46	0.0035
	Digital ornament	1.10	1.11	14.72	72.70	4.40	4.34	0.05	0.16	0.57	0.01385
9#	Bow-string patterns	1.60	1.54	14.25	71.64	4.23	5.30	0.07	0.15	0.36	0.00045
	Digital ornament	1.75	1.32	14.09	71.86	4.25	5.34	0.05	0.21	0.33	0.00044
Glaze		1.50	0.85	14.59	71.95	4.27	5.49	0.03	0.00	0.32	0.00029

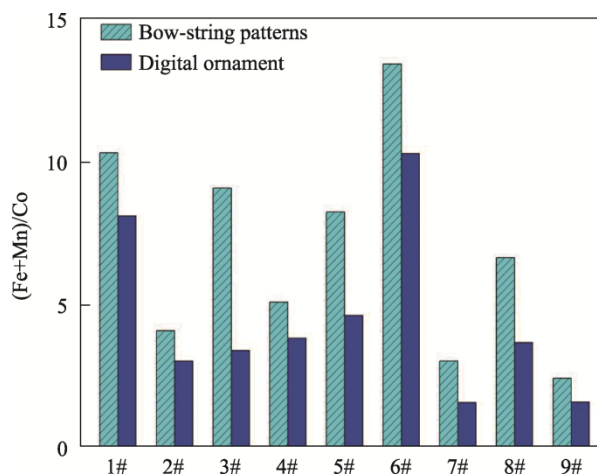


图 8 钴土矿提纯前后化学组成差异

Fig. 8 Different ratios of the Co ores before and after refinement



图 9 元代“头青”火照

Fig. 9 Excavated "head blue" fire juncture from a Yuan Dynasty site

3 结 论

本文采用能量色散 X 射线荧光光谱仪(EDXRF)对景德镇陶瓷大学馆藏元青花标本进行了无损测试分析,并结合钴料提纯实验模拟,得到了以下研究结论:

(1) 这批青花瓷标本所用钴料与景德镇官窑青花化学组成特征类似,且明显区别于云南国产元青花,属同一类“高铁低锰”型矿料,并含有一定量的 Ni、As,符合进口矿料的特点;

(2) 景德镇陶瓷大学馆藏元青花标本中主题纹饰与子母线旋纹中 Al_2O_3 含量较无明显差异,而两者 $m_{(\text{Fe}+\text{Mn})}/m_{\text{Co}}$ 比差异较为明显,前者应选用了 Fe、Mn 相对较低的钴料进行绘饰,而后者则使用了杂质较多的钴料绘饰所致;

(3) 结合提纯工艺模拟实验,证实随着钴料敲青、淘洗及磁选等处理后,原料 $m_{(\text{Fe}+\text{Mn})}/m_{\text{Co}}$ 比确有明显的下降趋势,并以此推断元青花瓷主题纹饰采用了工艺提纯的上等钴料进行绘饰,而子母线旋纹则可能采用了杂质较多的原生钴料绘饰;

(4) 依据考古文献、出土标本等考证,推测钴料提纯工艺在元代已开始出现,并对绘饰内容进行钴料有意识地分选使用,进而影响明清时期青花瓷绘饰体系的形成。

参考文献:

- [1] 李家治. 中国科学技术史: 陶瓷卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 吴隽, 李家治, 邓泽群, 等. 中国景德镇历代官窑青花瓷的断代研究[J]. 中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学, 2004, 34(5): 516–524.
WU J, LI J Z, DENG Z Q, et al. Scientia Sinica (Technologica), 2004, 34(5): 516–524.
- [3] ZHANG R Q, GETHIN P. Provenance of the cobalt pigment used for Jingdezhen minyao blue-and-white porcelain in the early Qing dynasty [J]. Ceramics International, 2021, 47(18): 25763–25768.
- [4] WANG L H, WANG C S. Co speciation in blue decorations of blue-and-white porcelains from Jingdezhen kiln by using XAFS spectroscopy [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(9): 1796–1801.
- [5] 陈尧成, 郭演仪, 张志刚. 历代青花瓷器和青花色料的研究[J]. 硅酸盐学报, 1978, 6(4): 225–241.
CHEN Y C, GUO Y Y, ZHANG Z G. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1978, 6(4): 225–241.
- [6] 陈尧成, 郭演仪, 陈虹. 中国元代青花钴料来源探讨[J]. 中国陶瓷, 1993(5): 57–62.
CHEN Y C, GUO Y Y, CHEN H. China Ceramics, 1993(5): 57–62.
- [7] 周仁. 景德镇瓷器的研究[M]. 上海: 科学出版社, 1958.
- [8] 李合, 谢西营, 丁银忠, 等. 浙江龙坦青花窑址标本的成分特征研究——兼谈青花“浙料”的相关问题[J]. 故宫博物院院刊, 2020(4): 93–101.
LI H, XIE X Y, DING Y Z, et al. Palace Museum Journal, 2020(4): 93–101.
- [9] 赵匡华. 试探中国传统玻璃的源流及炼丹术在其间的贡献[J]. 自然科学史研究, 1991(2): 145–156.
ZHAO K H. Studies in the History of Natural Sciences, 1991(2): 145–156.
- [10] 陈殿. 青花绘制技法分期与演变规律研究[J]. 华夏考古, 2013(2): 110–114.
CHEN D. Huaxia Archaeology, 2013(2): 110–114.
- [11] 陈殿. 元青花斑点的笔法研究——以元明墓葬出土文物为中心[J]. 考古与文物, 2015(1): 118–123.
CHEN D. Archaeology and Cultural Relics, 2015(1): 118–123.
- [12] 陈殿. 元明青花瓷上的工具线[J]. 大众考古, 2017(10): 66–68.
CHEN D. Popular Archaeology, 2017(10): 66–68.
- [13] 潘文锦. 青花用料试验总结[J]. 瓷器, 1963(2): 16–19.
PAN W J. China Ceramics, 1963(2): 16–19.
- [14] 王宗沐. 江西省大志(嘉靖)[M]//熊廖, 熊微. 中国陶瓷古籍集成. 上海: 上海文化出版社, 2006.
- [15] 张福康. 中国古陶瓷的科学[M]. 上海: 上海人民美术出版社, 2000.
- [16] 陆万垓. 江西省大志(万历)[M]//熊廖, 熊微. 中国陶瓷古籍集成. 上海: 上海文化出版社, 2006.
- [17] 宋应星. 天工开物·陶埏[M]//熊廖, 熊微. 中国陶瓷古籍集成. 上海: 上海文化出版社, 2006.
- [18] 唐英. 陶冶图编次[M]//熊廖, 熊微. 中国陶瓷古籍集成. 上海: 上海文化出版社, 2006.
- [19] 陶宗仪. 陶南村辍耕录[M]. 上海: 上海均益图书公司, 1906.
- [20] 李衍. 竹谱[M]. 北京: 中国书店, 2014.
- [21] 黄云鹏, 黄滨, 黄青. 元青花探究与工艺再现[M]. 南昌: 江西美术出版社, 2017.

(编辑 梁华银)